

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

EPO/66314

REC'D 15 JUL 2004

WIPO  
EPO-BERLIN

PCT

11 -06- 2004



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 35 443.3

Anmeldetag: 31. Juli 2003

Anmelder/Inhaber: Humboldt-Universität zu Berlin, 10099 Berlin/DE

Bezeichnung: Quantentopfstruktur

IPC: H 01 S, B 82 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 3. Juni 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Schmidt C."

Schmidt C.

## PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



Anmelder: Humboldt-Universität zu Berlin  
Unser Zeichen: I50001

### Quantentopfstruktur

- 5 Die vorliegende Erfindung betrifft eine Quantentopfstruktur (Quantum-Well-Struktur) sowie einen Quantentopf-Photodetektor (Quantum-Well-Photodetektor) und einen Quanten-Kaskaden-Laser.

Eine Quantentopfstruktur umfasst zwei Barrierenschichten aus Halbleitermaterial, und eine zwischen den beiden Barrierenschichten angeordnete sog.  
10 Quantentopfschicht (Quantum-Well-Schicht), die ebenfalls aus einem Halbleitermaterial hergestellt ist. Die Dicke der Quantentopfschicht, also ihre Ausdehnung in Normalenrichtung (d.h. in der Stapelrichtung der Schichten) ist meist deutlich geringer als ihre laterale Ausdehnung (d.h. senkrecht zur Stapelrichtung der Schichten) und beträgt typischerweise nur wenige nm.

- 15 Das elektrische Verhalten eines Halbleitermaterials lässt sich mit dem sog. Bändermodell beschreiben. Dieses besagt, dass den Elektronen des Halbleitermaterials verschiedene Energiebereiche, die sog. Energiebänder, zur Verfügung stehen, innerhalb derer sie im Wesentlichen beliebige Energiewerte annehmen können. Verschiedene Bänder können durch eine Bandlücke, d.h. einen Energiebereich mit Energiewerten, welche die Elektronen nicht annehmen können, voneinander getrennt sein. Die Anzahl der Elektronen, die ein Band aufnehmen kann, ist begrenzt. Für ein Halbleitermaterial sind das energetisch höchstliegende voll besetzte Band, 20 das sog. Valenzband, und das energetisch über dem Valenzband liegende, leere Leitungsband sowie die Bandlücke zwischen ihnen von besonderer Bedeutung.  
25

In Quantentopfstrukturen wie sie bspw. für Quantentopf-Infrarot-Photodetektoren, kurz QWIPs (Quantum-Well-Infrared-Photodetectors), oder Quanten-Kaskaden-Laser, kurz QCLs (Quantum-Cascade-Lasers), Verwendung finden, sind die Halbleitermaterialen für die Barrierenschichten und die Quantentopfschicht so gewählt, dass das Leitungsband des Barrierenmaterials energetisch höher liegt als das des Quantentopfmaterials. Diese Wahl führt dazu, dass die Elektronen der Quantentopfschicht nicht ohne weiteres in die Barrierenschichten eindringen können, so dass sie in der Quantentopfschicht eingeschlossen sind.

In der Quantentopfschicht wird das Verhalten der in ihr eingeschlossenen Elektronen aufgrund der geringen Dicke der Schicht (wenige Nanometer) durch quantenmechanische Effekte bestimmt. Ein wesentlicher Effekt ist dabei, dass die Elektronen in einem Energieband der Quantentopfschicht nicht mehr jeden beliebigen Energiewert innerhalb des Energierandes des Bandes annehmen können, sondern auf die Energiewerte bestimmter Energieniveaus festgelegt sind. Eine Änderung der Elektronenenergie erfolgt daher nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft von einem Energieniveau zu einem anderen. Nur dann, wenn der Energiezuwachs oder die Energieabgabe, die ein Elektron erfährt, genau der Differenz der Energiewerte zweier Energieniveaus entspricht, kann es von einem zum anderen Energieniveau wechseln. Übergänge von einem Energieniveau zu einem anderen innerhalb eines Bandes werden Intersubband-übergänge genannt.

In QWIPs und QCLs macht man sich die Intersubbandübergänge für das Detektieren oder Emittieren von Licht mit einer bestimmten Wellenlänge, also der Absorption oder Emission von Photonen mit einer bestimmten Photonenenergie, zunutze. Die dafür verwendeten Quantentopfschichten sind sehr homogen, da sich in homogenen Quantentopfschichten die Energien der Energieniveaus durch geeignete Wahl der Dicke der Quantentopfschicht genau einstellen lassen, und damit auch die Energie der zu absorbierenden bzw. der emittierten Photonen. Die Energiewerte der Energieniveaus in den

- Energiebändern einer Quantentopfschicht reagieren dabei sehr empfindlich auf Änderungen der Schichtdicke. Quantenmechanische Prinzipien, sog. Auswahlregeln, erlauben die Absorption bzw. Emission in derart homogenen Quantentopfschichten jedoch nur dann, wenn das zu absorbierende Photon 5 bzw. das emittierte Photon ein elektrisches Feld besitzt; dessen Polarisationsrichtung in Normalenrichtung der Quantentopfschicht verläuft. Da das elektrische Felde eines Photons senkrecht in Bezug auf seine Ausbreitungsrichtung polarisiert ist, bedeutet dies, dass Licht welches in Normalenrichtung der Quantentopfschicht einfällt, nicht detektiert werden 10 kann (QWIP) bzw. dass kein Licht in Normalenrichtung emittiert wird (QCL). Die Detektion bzw. Emission in Normalenrichtung wäre jedoch von Vorteil, da sie das Ein- und Auskoppeln von Licht in die bzw. aus der Quantentopfstruktur vereinfachen würde.
- 15 Es gibt daher verschiedene Ansätze, die Absorption von in Normalenrichtung einfallendem Licht bzw. die Emission von Licht in Normalenrichtung zu ermöglichen.
- In US 6 423 980 ist bspw. vorgeschlagen, über einer Quantentopfstruktur für 20 einen QWIP ein Beugungsgitter anzurichten, die einen großen Teil des in Normalenrichtung einfallenden Lichtes aus der Normalenrichtung ablenkt, so dass es sich in der Quantentopfstruktur nicht in Normalenrichtung ausbreitet und demzufolge absorbiert werden kann. Eine tatsächliche Absorption von Photonen, die sich in der Quantentopfstruktur in Normalenrichtung bewegen, 25 findet jedoch nicht statt.
- Ein anderer Ansatz sieht vor, die Ursache für das beschriebene Absorptions- bzw. Emissionsverhalten zu beseitigen. Die Homogenität der Quantentopfschicht bedeutet auch, dass eine homogene Verteilung der Elektronendichte 30 in der Schicht vorliegt. Diese Homogenität in der Verteilung der Elektronendichte ist die Ursache dafür, dass in Normalenrichtung der Quantentopfschicht einfallende Photonen in der Quantentopfschicht nicht absorbiert werden können. Es wurde daher bspw. in J. Phillips et al. „Self-assembled InAs-GaAs quantum dot intersubband detectors“, IEEE Journal of

4

Quantum Electronics 35, Seiten 936-943, 1999 vorgeschlagen, Quantenpunkte (sog. Quantendots), also quasi-eindimensionale Strukturen, in die Quantentopfschicht eines QWIPs einzuführen; um die Homogenität der Schicht aufzuheben. Das Aufheben der Homogenität durch die Quantenpunkte hat zur Folge, dass in der entsprechenden Quantentopfschicht auch die Absorption von in Normalenrichtung einfallendem Licht, also von Photonen, deren elektrisches Feld nicht in Normalenrichtung der Schicht polarisiert ist, möglich ist. Jedoch erschweren bspw. Variationen in der Größe der in der Quantentopfschicht angeordneten Quantenpunkte das genaue Einstellen der Energiewerte der Energieniveaus in der Quantentopfschicht, und damit das Einstellen der zu absorbierenden Photonenergie. Außerdem müssen die Quantenpunkte aus energetischen Gründen relativ weit voneinander beabstandet sein, um zu einer signifikanten Aufhebung der Homogenität zu führen. Der große Abstand führt aber zu einer relativ geringen Flächendichte der Elektronen, da diese in den Bereichen der Quantenpunkte lokalisiert sind, d.h. die Elektronendichte ist im Bereich der Quantenpunkte hoch und dazwischen niedrig, was sich nachteilig auf das Absorptions- bzw. Emissionsverhalten der Quantentopfschicht auswirkt. Schließlich führen die Quantenpunkte auch zu einer Beschränkung in der minimal möglichen Dicke der Quantentopfschicht, was die Einstellmöglichkeiten für die Energien der zu absorbierenden Photonen eingrenzt.

Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine verbesserte Quantentopfstruktur, einen Quantentopf-Photodetektor sowie einen Quantenkaskaden-Laser zu schaffen, welche die Absorption von in Normalenrichtung einfallendem Licht ermöglichen.

Diese Aufgabe wird durch eine Quantentopfstruktur nach Anspruch 1, einen Quantentopf-Photodetektor nach Anspruch 11 und einen Quantenkaskaden-Laser nach Anspruch 12 gelöst. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur.

- Eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur umfasst eine zwischen zwei Barrierenschichten angeordnete Quantentopfschicht. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass mindestens eine der Barrierenschichten Nanostrukturen umfasst, die eine ohne die Nanostrukturen vorhandene laterale Homogenität der Barrierenschicht, d.h. eine Homogenität in den Richtungen, die Senkrecht zur Stapelrichtung der Schichten in der Quantentopfstruktur verlaufen, aufheben oder modulieren. Als Nanostrukturen sollen hierbei Strukturen anzusehen sein, die in mindestens einer Ausdehnungsrichtung eine Abmessung von 100 nm oder weniger besitzen. Die in der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur verwendeten Nanostrukturen weisen jedoch vorzugsweise in mindestens einer Ausdehnungsrichtung eine Ausdehnung von maximal 50 nm auf. Weiter vorzugsweise liegt die Abmessung im Bereich von 5 bis 15 nm.
- 15 Die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur ermöglicht die Absorption bzw. Emission von Photonen in Normalenrichtung der Quantentopfschicht, ohne das genaue Einstellen der Energiewerte der Energieniveaus in der Quantentopfschicht, und damit das Einstellen der zu absorbierenden Photonenergie, wesentlich zu erschweren. Da in der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur keine Quantenpunkte in der Quantentopfschicht selbst vorhanden zu sein bräuchen, verringert sich die Flächendichte der Elektronen der Quantentopfschicht nicht wesentlich. Auch gibt es in der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur keine wesentliche Beschränkung in der minimal möglichen Dicke der Schicht, so dass ein hoher Flexibilitätsgrad beim Einstellen der Energiewerte zu absorbierender oder zu emittierender Photonen möglich ist.

Die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur beruht auf den nachfolgend dargelegten Überlegungen:

- 30 Die typischen Materialien, die in den Barrierenschichten und den Quantentopfschichten Verwendung finden, weisen eine kristalline Struktur auf, d.h. ihre Atome weisen eine regelmäßige Anordnung auf; sie bilden die sog. Gitterstruktur des kristallinen Materials. Wenn sich die Gitterstruktur des

Materials im Wesentlichen ungestört fortsetzt, so ist es als homogenes Volumenmaterial anzusehen. Streckungen und Stauchungen der Gitterstruktur als Ganzes sollen hierbei im Wesentlichen nicht als Störungen angesehen werden.

5

Wird die Homogenität der Quantentopfschicht wie im Stand der Technik durch Quantenpunkte gestört, um eine Absorption oder Emission von in Normalenrichtung der Schicht einfallenden Photonen zu ermöglichen, so beeinflusst dieser Eingriff in die Quantentopfschicht die Einstellung der Energiewerte der Energieniveaus in einer schwer vorhersehbaren Weise.

10

Die Erfindung basiert nun auf der Erkenntnis, dass eine Absorption oder Emission von in Normalenrichtung der Schicht einfallenden Photonen auch durch das Aufheben oder Modulieren der Homogenität mindestens einer der

15

Barrierenschichten ermöglicht werden kann. Die Ursache hierfür ist, dass die Homogenität der Verteilung der Elektronendichte in der Quantentopfschicht, die das Absorbieren von in Normalenrichtung einfallenden Photonen bzw. das Emittieren von Photonen in Normalenrichtung verhindert, nicht nur von der Homogenität der Gitterstruktur der Quantentopfschicht abhängt, sondern

20

auch von den Bedingungen an den Grenzflächen zu den Barrierenschichten. Die Bedingungen an de Grenzflächen hängen jedoch auch von der Struktur der Barrierenschichten ab. Durch das Aufheben oder Modulieren der Homogenität mindestens einer Barrierenschicht kann daher die Homogenität der Verteilung der Elektronendichte in der Quantentopfschicht in lateraler

25

Richtung aufgehoben oder moduliert werden, ohne die Gitterstruktur der Quantentopfschicht wesentlich zu beeinflussen. Entsprechend bleiben auch die Energiewerte der Energieniveaus vom Aufheben oder Modulieren der Homogenität mindestens einer der Barrierenschichten im Wesentlichen unbeeinflusst, so dass das gezielte Einstellen der Energiewerte nicht

30

beeinträchtigt wird. Außerdem wird die Flächendichte der Elektronen nicht derart stark beeinflusst, wie durch Quantenpunkte, die in der Quantentopfschicht angeordnet sind.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur sind als Nanostrukturen selbstorganisierte dreidimensionale Strukturen vorhanden, die insbesondere als Quantenpunkte (Quantum Dots) oder Quantendrähte (Quantum Wires) ausgestaltet sein können. Die selbstorganisierten Strukturen stellen eine Möglichkeit dar, die Nanostrukturen gezielt herzustellen. Als Quantenpunkte sollen hierbei Nanostrukturen angesehen werden, deren Abmessungen in allen lateralen Richtungen weniger als 100 nm, insbesondere weniger als 50 nm, betragen und vorzugsweise im Bereich von 5 bis 15 nm liegen. Quantendrähte zeichnen sich gegenüber Quantenpunkten dadurch aus, dass ihre Ausdehnung in einer lateralen Richtung deutlich größer als in anderen lateralen Richtungen ist. Insbesondere können die Quantendrähte in der entsprechenden lateralen Ausdehnungsrichtung die genannten Abmessungen auch überschreiten. Die Abmessung der Quantendrähte oder Quantenpunkte in vertikaler Richtung betragen nicht mehr als ca. 10 nm, insbesondere liegen sie im Bereich von 1 bis 5 nm und vorzugsweise im Bereich von 2 bis 3 nm.

Besonders gut lassen sich zum Herstellen der selbstorganisierten Strukturen Materialien verwenden, deren Gitterstruktur gegenüber der Gitterstruktur der Barrierenschicht deutlich gestreckt ist. Je gestreckter die Gitterstruktur ist, desto größer ist der Abstand der Atome im Gitter voneinander. Ein Maß für den Abstand, den die Atome in einer Gitterstruktur voneinander haben, ist die sog. Gitterkonstante der Gitterstruktur. In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Nanostrukturen sind diese daher aus einem Material hergestellt, das eine deutlich größere Gitterkonstante aufweist, als das Material der Barrierenschicht.

In einer weiteren Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur ist die Barrierenschicht als Aluminiumarsenidschicht (AlAs-Schicht), mit Indiumarsenidinseln (InAs-Inseln) als Nanostrukturen oder als Indiumphosphidschicht (InP-Schicht) mit Indiumarsenidinseln (InAs-Inseln) als Nanostrukturen ausgebildet. Die Verarbeitung der genannten Materialien ist in der Halbleitertechnologie weit verbreitet, so dass in ihrer Handhabung

beim Herstellen der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur auf einen reichen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden kann.

- Um ihre Effizienz der Quantentopfstruktur beim Absorbieren oder Emissieren von Photonen zu steigern, können in einer Weiterbildung der erfindungsgemäßen Quantentopfstruktur zwei oder mehr Quantentopfschichten vorhanden sein, die jeweils mindestens durch eine Barrierenschicht voneinander getrennt sind.
- Ein erfindungsgemäßer Quanten-Kaskaden-Laser (QCL) und ein erfindungsgemäßer Quantentopf-Photodetektor, der insbesondere als Quantum-Well-Infrarot-Photodetektor (QWIP) ausgebildet sein kann, umfassen jeweils mindestens eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur..
- Weitere Merkmale, Eigenschaften und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen, wobei auf die beiliegenden Zeichnungen Bezug genommen wird.

- Fig. 1 zeigt in schematischer Darstellung einen ersten Infrarot Photodetektor als erstes Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur.
- Fig. 2 zeigt in schematischer Darstellung einen zweiten Infrarot Photodetektor als zweites Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur.
- Fig. 3 zeigt in schematischer Darstellung einen dritten Infrarot Photodetektor als drittes Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur.
- Fig. 4 zeigt in schematischer Darstellung einen Quanten-Kaskaden-Laser als vierter Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur.

Fig. 5 zeigt eine Barrierenschicht des vierten Ausführungsbeispiels im Detail.

In Fig. 1 ist als erstes Ausführungsbeispiel schematisch eine spezielle Form  
 5 des QWIPs, nämlich ein sog. Gamma-Valley-Normal-Incidence-Infrared Photodetctor, dargestellt, der im Folgenden als GV-QWIP bezeichnet wird. Die Bezeichnung „Gamma-Valley“ deutet auf einen bestimmten Bereich des Energiebandes, in dem die Intersubbandübergänge stattfinden, hin. Sie soll hier nicht weiter erläutert werden. Im GV-QWIP ist zwischen einer oberen  
 10 Kontak- und Deckschicht 3 und einer unteren Kontaktsschicht 5 eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur angeordnet, in der eine Absorption von Photonen stattfindet, die zu einer messbaren Spannung im Detektor führt. Die obere Kontaktsschicht 3 und die untere Kontaktsschicht 5 sind jeweils  
 15 als siliziumdotierte Gallium-Arsenid-Schicht (GaAs:Si) mit einer Dicke von ca. 500 nm ausgeführt.

Die Quantentopfstruktur ist als periodische Struktur mit 30 Perioden 1 ausgebildet, von denen in Figur 1 nur eine stellvertretend dargestellt ist. Jede Periode 1 umfasst eine Quantentopfschicht 7 mit einer Schichtdicke von ca.  
 20 4 nm, eine über der Quantentopfschicht 7 angeordnete Barrierenschicht 9 mit einer Schichtdicke von ca. 2,5 nm und eine über der Barrierenschicht 9 angeordnete Abstandshalterschicht 11 (Spacer Layer) mit einer Schichtdicke von ca. 25 nm, die eine weitere Barrierenschicht darstellt. Die Abstandshalterschicht 11 ist im vorliegenden Ausführungsbeispiel als Aluminium-Gallium-Arsenid-Schicht (AlGaAs) ausgebildet. Jede Quantentopfschicht 7 ist somit zwischen zwei Barrierenschichten angeordnet, nämlich zwischen der Barrierenschicht 9, die an die Oberseite der Quantentopfschicht 7 angrenzt, und der Abstandshalterschicht 11 der nächst tiefer liegenden, d.h. näher am Substrat liegenden, Periode 1.

30 Die Quantentopfschicht 7 ist als siliziumdotierte Gallium-Arsenid-Schicht ausgebildet und stellt die eigentliche Detektorschicht der Periode dar, d.h. in ihr findet die Absorption der Photonen statt. Um die Absorption von Photonen, die in Normalenrichtung der Quantentopfschicht 7 einfallen, zu

ermöglichen, enthält die Barrierenschicht 9 Indium-Arsenid-Inseln 10 als Nanostrukturen. Die Barrierenschicht 9 selbst ist als Aluminium-Arsenid-Matrix für die Indiumarsenidinseln 10 ausgebildet. Die laterale Ausdehnung der Inseln beträgt weniger als 50 nm, vorzugsweise 5 bis 15 nm und ihre  
 5 Ausdehnung in Normalenrichtung der Barrierenschicht 9 ca. 1 - 5 nm, vorzugsweise 2 - 3 nm. Die Inseln 10 sind dabei so in der Barrierenschicht 9 angeordnet, dass ihr Abstand zur Quantentopfschicht 7 im Bereich von 0,3 bis 2 nm liegt. Vorzugsweise sollte der Abstand jedoch im Bereich von 0,5 bis 1 nm liegen. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel beträgt der Abstand  
 10 ca. 1 nm oder etwas weniger.

Damit auch die Quantentopfschicht 7 der untersten Periode 1 zwischen zwei Barrierenschichten angeordnet ist, schließt sich an die Unterseite dieser untersten Quantentopfschicht 7 eine untere Abstandshalterschicht 13 an, die  
 15 wie die übrigen Abstandshalterschichten 11 als Aluminium-Gallium-Arsenid-Schicht ausgebildet ist. Substratseitig folgt auf die Abstandshalterschicht 13 eine siliziumdotierte Gallium-Arsenid-Schicht 15 als weitere Abstandshalter-Schicht, die nicht als Barrierenschicht dient. Zwischen der siliziumdotierten Gallium-Arsenid-Schicht 15 und dem Substrat (nicht dargestellt) ist darüber  
 20 hinaus eine siliziumdotierte Indium-Gallium-Phosphid-Schicht (InGaP:Si) 17 vorhanden, die beim Herstellen der Quantentopfstruktur als Ätzstop dient.

Fig. 2 zeigt als zweites Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur eine alternative Ausgestaltung des GV-QWIPs. Im in  
 25 Fig. 2 dargestellten GV-QWIP ist wie im ersten Ausführungsbeispiel zwischen einer oberen Kontakt- und Deckschicht 103 und einer unteren Kontaktsschicht 105 eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur angeordnet. Die obere Kontaktsschicht 103 ist in vorliegenden Ausführungsbeispiel als siliziumdotierte Indium-Gallium-Arsenid-Schicht (InGaAs:Si) mit einer Dicke  
 30 von ca. 500 nm ausgeführt, während die untere Kontaktsschicht 105 als siliziumdotierte Indium-Phosphid-Schicht ausgebildet ist, die gleichzeitig das Substrat des GV-QWIP darstellt. Zwischen dem Substrat 105 und der Quantentopfstruktur ist eine ca. 200 nm dicke Indium-Gallium-Arsenid-Schicht als Pufferschicht 106 angeordnet.

- Die Quantentopfstruktur ist in Normalenrichtung als periodische Struktur mit 50 Perioden 101 ausgebildet, von denen in Figur 2 nur eine stellvertretend dargestellt ist. Jede Periode 101 des zweiten Ausführungsbeispiels umfasst
- 5 eine Quantentopfschicht 107 mit einer Schichtdicke von ca. 4 nm, über der eine Barrierenschicht 109 mit einer Schichtdicke von mindestens ca. 2 bis 2,5 nm angeordnet ist. Über der Barrierenschicht 109 befindet sich wie im GV-QWIP des ersten Ausführungsbeispiels eine Abstandshalterschicht 111 mit einer Schichtdicke von ca. 25 nm, die eine weitere Barrierenschicht darstellt. Im Unterschied zum GV-QWIP des ersten Ausführungsbeispiels 10 umfasst jede Periode 107 darüber hinaus eine weitere gleichzeitig als Barrierenschicht dienende Abstandshalterschicht 112 mit einer Dicke von ca. 25 nm, die substratseitig an die Quantentopfschicht 107 angrenzt. Die über der Barrierenschicht 109 angeordnete Abstandshalterschicht 111 ist im 15 Unterschied zum ersten Ausführungsbeispiel als Indium-Aluminium-Arsenid-Schicht ausgebildet, ebenso die substratseitig an die Quantentopfschicht 107 angrenzende Abstandshalterschicht 112.
- Die Quantentopfschicht 107 ist im zweiten Ausführungsbeispiel als 20 siliziumdotierte Indium-Galium-Arsenid-Schicht (InGaAs:Si) ausgebildet und stellt die eigentliche Detektorschicht der Periode 101 dar. Die Barrierenschicht 109 ist als Aluminium-Arsenid-Matrix ausgebildet, in die Indium-Arsenid-Inseln 110 eingebettet sind. Die laterale Ausdehnung der Inseln beträgt weniger als 50 nm, vorzugsweise 5 bis 15 nm. Die Inseln 110, die in 25 Normalenrichtung der Barrierenschicht 109 eine Ausdehnung von 1 bis 5 nm, vorzugsweise von 2 bis 3 nm, aufweisen, sind dabei so in der Barrierenschicht 109 angeordnet, dass ihr Abstand zur Quantentopfschicht deutlich weniger als 1 nm beträgt und insbesondere zwischen 0,5 und 0,8 nm liegt.
- 30 Ein drittes Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Quantentopfstruktur ist in Fig. 3 gezeigt. Das Ausführungsbeispiel stellt einen sog. X-Valley-Normal-Incidence-Infrared-Photodetector, im Folgenden kurz XV-QWIP genannt, dar. Die Bezeichnung „X-Valley“ deutet wie die Bezeichnung

„Gamma-Valley“ auf einen bestimmten Bereich des Energiebandes, in dem die Intersubbandübergänge stattfinden, hin.

Im in Fig. 3 dargestellten XV-QWIP ist eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur zwischen einer oberen Kontakt- und Deckschicht 203 mit einer Dicke von ca. 500 nm und einer unteren Kontaktsschicht 205, die gleichzeitig das Substrat des XV-QWIP darstellt, angeordnet. Beide Kontaktsschichten 203, 205 sind im dritten Ausführungsbeispiel als siliziumdotierte Gallium-Phosphid-Schicht ausgeführt. Zwischen dem Substrat 205 und der Quantentopfstruktur ist zudem eine weitere, ca. 200 nm dicke siliziumdotierte Gallium-Phosphid-Schicht als Pufferschicht 206 angeordnet.

Die Quantentopfstruktur ist wie im GV-QWID des zweiten Ausführungsbeispiels in Normalenrichtung als periodische Struktur mit 50 Perioden 201 ausgebildet, von denen in Figur 3 nur eine stellvertretend dargestellt ist. Jede Periode 201 des dritten Ausführungsbeispiels umfasst eine Quantentopfschicht 207 mit einer Schichtdicke von ca. 2,5 nm. Über der Quantentopfschicht 207 ist eine Barrierenschicht 209 und darüber eine Abstandshalterschicht 211, die eine weitere Barrierenschicht darstellt, mit einer Schichtdicke von ca. 25 nm angeordnet. Wie beim GV-QWIP des zweiten Ausführungsbeispiels umfasst jede Periode 207 darüber hinaus eine weitere gleichzeitig als Barrierenschicht dienende Abstandshalterschicht 212 mit einer Dicke von ca. 25 nm, die substratseitig an die Quantentopfschicht 207 angrenzt. Beide Abstandshalterschichten 211, 212 sind als Gallium-Phosphid-Schichten (GaP) ausgebildet.

Im XV-QWID des dritten Ausführungsbeispiels ist die Quantentopfschicht 207 als siliziumdotierte Aluminium-Phosphid-Schicht (AlP:Si) ausgebildet und stellt die eigentliche Detektorschicht der Periode 201 dar. Die Barrienschicht 209 ist als Indium-Phosphidschicht oder als (Al,Ga)P-Matrix, d.h. aus einer Mischung von Aluminium-Phosphid und Gallium-Phosphid, ausgebildet, in die Indium-Arsenid-Inseln 210 eingebettet sind. Die Mischung (Al,Ga)P soll dabei auch die Grenzfälle von reinem AlP oder reinem GaP umfassen. Die laterale Ausdehnung der Inseln beträgt auch in diesem Ausführungsbeispiel

- weniger als 50 nm, vorzugsweise 5 bis 15 nm, ihre Ausdehnung in Normalenrichtung der Barrierenschicht 209 liegt zwischen 1 und 5 nm, vorzugsweise zwischen 2 und 3 nm. Die Inseln 210 sind dabei so in der Barrierenschicht 209 angeordnet, dass ihr Abstand zur Quantentopfschicht 7 5 im Bereich von 0 bis 2 nm liegt. Dabei sollte der Abstand der Inseln 210 von der Quantentopfschicht möglichst gering sein, also möglichst nahe Null liegen. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel erstrecken sich die Inseln 210 in Normalenrichtung im Wesentlichen durch die gesamte Barrierenschicht 209.
- 10 Fig.4 zeigt als viertes Ausführungsbeispiel schematisch einen  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  Quanten-Kaskaden-Laser, QCL. Der gezeigte QCL umfasst eine periodische Struktur, von der eine Periode in Fig.4 dargestellt ist. Diese Periode kann sich in einem QCL bis zu mehreren Dutzend Mal wiederholen. Jede Periode des QCL umfasst eine Anzahl einander 15 abwechselnd angeordneter Quantentopfschichten 301A – 301H und Barrierenschichten 303A - 303H. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind die Quantentopfschichten 301A – 301H als Gallium-Arsenid-Schichten und die Barrierenschichten 303A – 303C sowie die Barrierenschichten 303E - 303H 20 als Aluminium-Gallium-Arsenid-Schichten (AlGaAs) ausgebildet. Die Zusammensetzung und die Struktur der Barrierenschicht 303D wird weiter unten mit Bezug auf Fig. 5 erläutert.
- In einem QCL werden Intersubbandübergänge von Elektronen in der Quantentopfschicht 301C zum Emittieren von Photonen mit einer bestimmten 25 Photonenenergie ausgenutzt. Für das Emittieren von Photonen sind dabei vor allem die Quantentopfschichten 301C, 301D sowie die Barrierenschicht 303D von Bedeutung. Ein Elektron, das sich in der Quantentopfschicht 301D auf einem Energieniveau mit einem hohen Energiewert befindet, kann in einem quantenmechanischen Prozess durch die Barrierenschicht 303D 30 hindurch in die Quantentopfschicht 303C gelangen, man spricht hierbei davon, dass das Elektron die Barrierenschicht 303D durchtunnelt. Die physikalischen Eigenschaften der Schichten 301C, 301D und 303D sind so gewählt, dass das Elektron nach dem Durchtunnen der Barrierenschicht 303D in der Quantentopfschicht 303C von dem Energieniveau mit dem

hohen Energiewert auf ein Energieniveau mit einem niedrigen Energiewert übergeht, wobei es ein Photon aussendet, dessen Energie der Differenz der beiden Energiewerte entspricht.

- 5 In der Barrierenschicht 303D sind Nanostrukturen 310 angeordnet, welche die Homogenität der Barrierenschicht 303D in lateraler Richtung und somit die laterale Homogenität der Verteilung der Elektronendichte in der Quantentopfschicht 303C modulieren. Die Barrierenschicht 303D ermöglicht so das Emittieren von Photonen in Normalenrichtung der Quantentopfschicht 303C,  
10 ohne die Homogenität der Quantentopschicht 303C selber aufzuheben oder zu modulieren.

- Die Barrierenschicht 303D ist in Fig. 5 im Detail gezeigt. Zwischen zwei Aluminium-Gallium-Arsenid-Schichten 304 und 306 mit einer Dicke von ca.  
15 1,4 nm bzw. 0,8 nm ist eine Aluminium-Arsenid-Schicht 308 angeordnet, die als Matrix für Indium-Arsenid-Inseln 310 als Nanostrukturen dient. Die Indium-Arsenid-Inseln 310 weisen in Normalenrichtung der Aluminium-Arsenid-Schicht 308 eine Ausdehnung von ca. 0,6 nm auf. Sie sind derart in die Aluminium-Arsenid-Schicht 308 eingebettet, dass sie zu den Aluminium-Gallium-Arsenid-Schichten 304 und 306 jeweils einen Abstand von ca. 0,6  
20 nm aufweisen. In Summe beträgt die Dicke der Aluminium-Arsenid-Schicht 308 daher ca. 1,8 nm, so dass die Barrierenschicht 303D insgesamt eine Dicke von ca. 4 nm aufweist.
- 25 In den beschriebenen Ausführungsbeispielen sind die lateralen Abmessungen der Nanostrukturen so gewählt, dass sie in lateraler Richtung nicht größer als ca. 50 nm sind und vorzugsweise im Bereich von 5 bis 15 nm liegen. Derart kleine Strukturen können auch als Quantenpunkte angesehen werden. Die optimalen Abmessungen der Quantenpunkte können dabei vom  
30 verwendeten Material abhängen. Die Nanostrukturen können statt als Quantenpunkte jedoch auch als Quantendrähte ausgebildet sein und insbesondere auch in einer lateralen Richtung eine größere Ausdehnung als 50 nm aufweisen, ohne die Funktion, die sie als Nanostrukturen im Rahmen der Erfindung übernehmen, wesentlich zu beeinträchtigen.

In den beschriebenen Ausführungsbeispielen sind Aluminium-Arsenid-Barrierenschichten mit Indium-Arsenid-Inseln als Nanostrukturen sowie (In, Ga,Al)P-Schichten (d.h. Schichten aus einer Mischung von Indium-, Gallium-

- 5 und Aluminium-Phosphid, wobei die Mischung auch reines Indium-, Gallium- oder Aluminium-Phosphid sein kann) mit Indium-Arsenid-Inseln als Nanostrukturen beschrieben. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht auf diese Materialauswahl beschränkt. Vielmehr eignen sich eine Vielzahl von Materialkombinationen, die vorzugsweise derart gewählt sind, dass das für die Inseln  
10 verwendete Material eine deutlich größere Gitterkonstante aufweist, als das für die Barrierenschicht verwendete Material, da dies die Selbstorganisation der Inseln im Barrierenmaterial fördert.

Die in den Ausführungsbeispielen beschrieben Schichten können in

- 15 bekannter Weise bspw. mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE, Molecular Beam Epitaxie) oder mittels<sup><</sup> chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) erzeugt werden.

Patentansprüche

1. Quantentopfstruktur mit einer zwischen zwei Barrierenschichten (9; 11; 109; 112; 209; 212; 303) angeordneten Quantentopfschicht (7; 107; 207; 301), dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der Barrierenschichten (9; 11; 109; 112; 209; 212; 303) Nanostrukturen (10; 110; 210; 310) umfasst, die eine ohne die Nanostrukturen (10; 110; 210; 310) vorhandene laterale Homogenität der Barrierenschicht (9; 109; 209; 303D) aufheben oder modulieren.
- 10 2. Quantentopfstruktur nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Nanostrukturen selbstorganisierte dreidimensionale Strukturen (10; 110; 210; 310) vorhanden sind.
- 15 3. Quantentopfstruktur nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die selbstorganisierten dreidimensionalen Strukturen (10; 110; 210; 310) aus einem Material hergestellt sind, das eine deutlich größere Gitterkonstante als das Material der Barrierenschicht (9; 109; 209; 303D) besitzt.
- 20 4. Quantentopfstruktur nach Anspruch 2 oder 3, gekennzeichnet durch die Ausgestaltung der selbstorganisierten dreidimensionalen Nanostrukturen (10; 110; 210; 310) als Quantenpunkte.
- 25 5. Quantentopfstruktur nach Anspruch 2 oder 3, gekennzeichnet durch die Ausgestaltung der selbstorganisierten dreidimensionalen Nanostrukturen (10; 110; 210; 310) als Quantendrähte.
- 30 6. Quantentopfstruktur nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der Barrierenschichten als Aluminiumarsenidschicht (9; 109; 303D) ausgebildet ist, die Indiumarsenidinseln (10; 110; 310) als Nanostrukturen umfasst.

7. Quantentopfstruktur nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der Barrierenschichten als Indiumphosphidschicht (209) ausgebildet ist, die Indiumarsenidinseln (210) als Nanostrukturen umfasst.

5

8. Quantentopfstruktur nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sie mindestens zwei Quantentopfschichten (7; 107; 207; 301) umfasst, die jeweils mindestens durch eine Barrierenschicht (9, 11; 109, 112; 209, 212; 303) voneinander getrennt sind

10

9. Quantentopfstruktur nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Nanostrukturen (10; 110; 210; 310) in mindestens einer lateralen Ausdehnungsrichtung eine Abmessung von weniger als 50 nm aufweisen.

15

10. Quantentopfstruktur nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass Abmessung im Bereich von 5 bis 15 nm liegt.

20

11. Quantentopf-Photodetektor mit mindestens einer Quantentopfstruktur nach einem der Ansprüche 1 bis 10.

12. Quanten-Kaskaden-Laser mit mindestens einer Quantentopfstruktur nach einem der Ansprüche 1 bis 10.

25

Zusammenfassung

Eine erfindungsgemäße Quantentopfstruktur umfasst eine zwischen zwei Barrierenschichten 109, 112 angeordnete, Quantentopfschicht 107. Sie  
5 zeichnet sich dadurch aus, dass mindestens eine der Barrierenschichten 109 Nanostrukturen 110 umfasst, die eine ohne die Nanostrukturen 110 vorhandene laterale Homogenität der Barrierenschicht 109, d.h. eine Homogenität in den Richtungen, die Senkrecht zur Stapelrichtung der Schichten in der Quantentopfstruktur verlaufen, aufheben oder modulieren.

10

Fig. 2

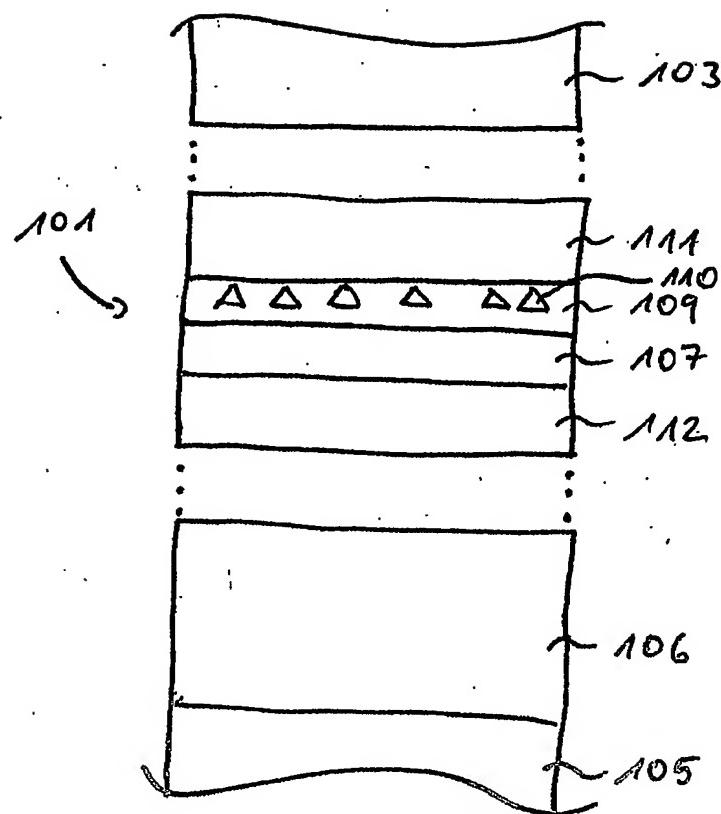


Fig. 2

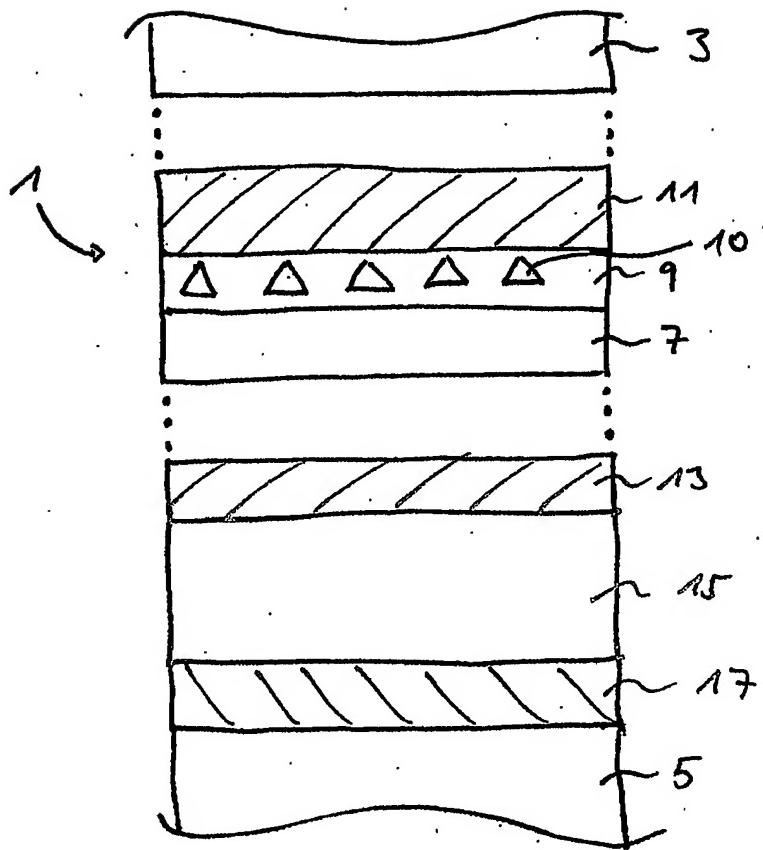


Fig. 1

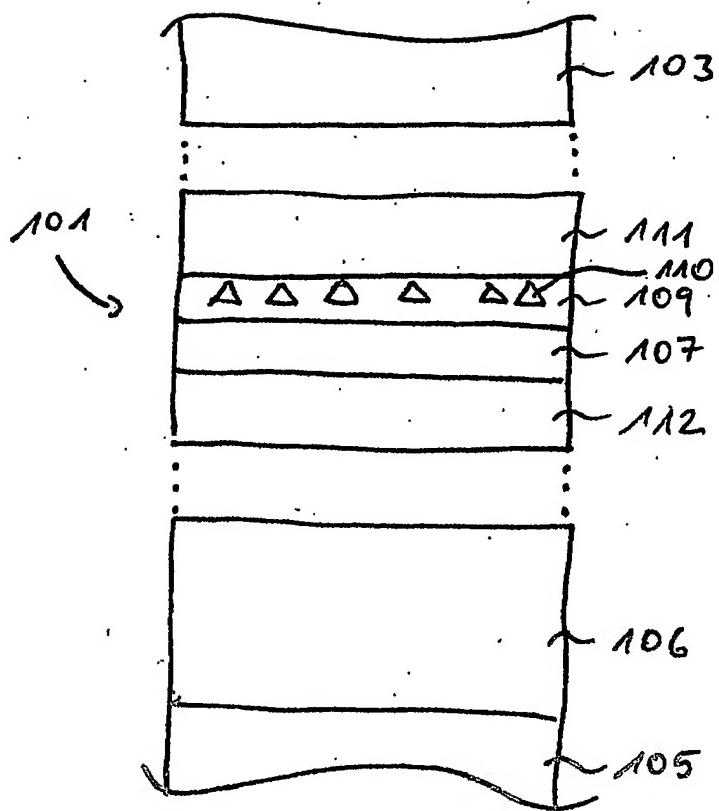


Fig. 2

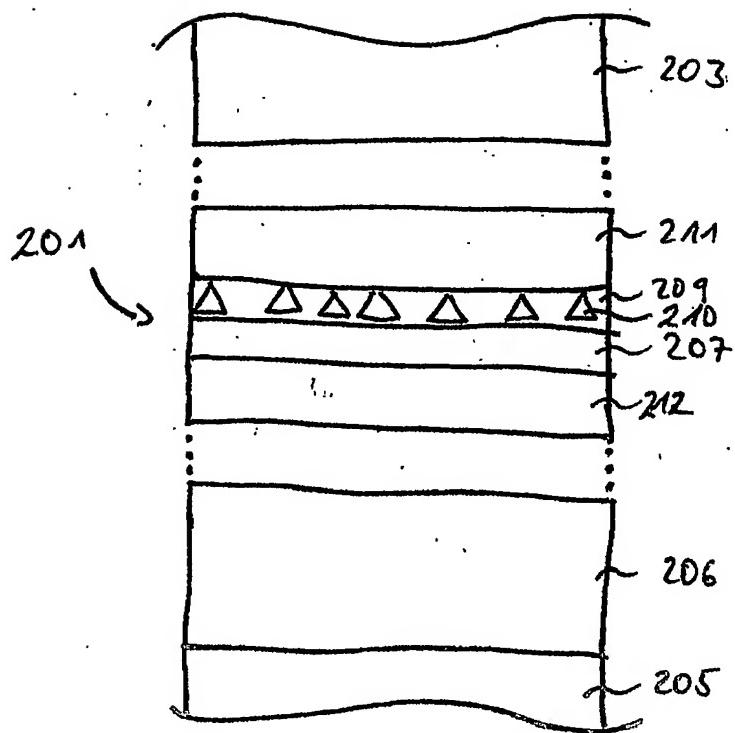


Fig. 3

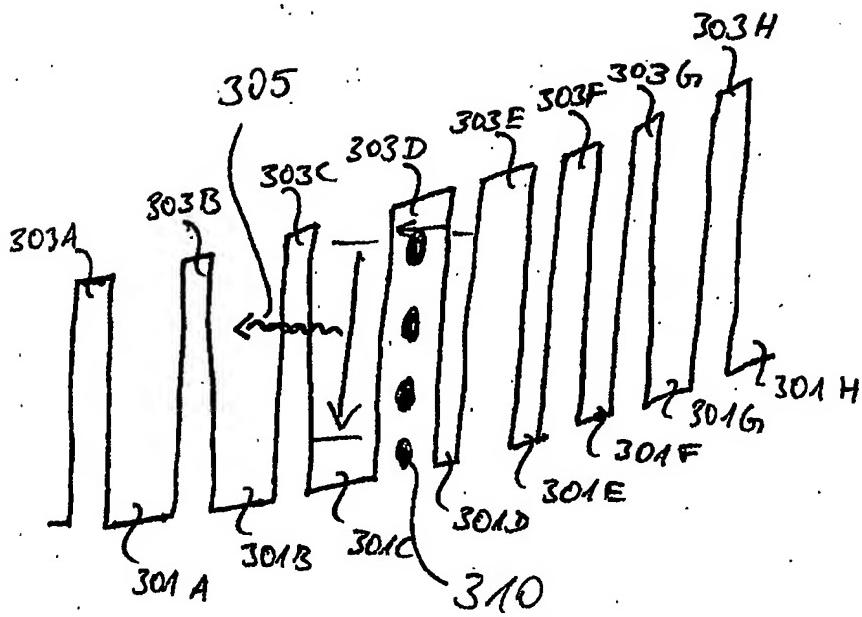


Fig. 4

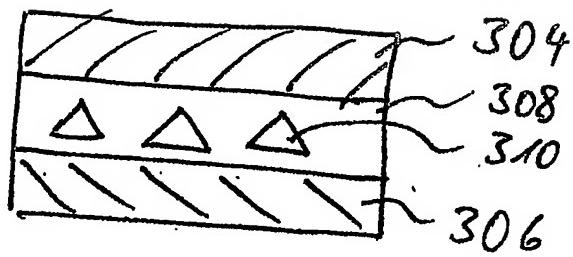


Fig. 5